J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.35～41 (2013)

古典を読む

J.D. Rhoades, P.A. Raats and R.J. Prather 著「液相の電気伝導率，土壌水分量と土粒子表面の電気伝導率が土壌の電気伝導率に及ぼす影響」

柳井洋介 [1]・宮本輝仁 [2]・取出伸夫 [3]

Reviewing classical studies in soil physics

"Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity" by J.D. Rhoades, P.A. Raats and R.J. Prather, Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 651–655 (1976)

Yosuke YANAI[1], Teruhito MIYAMOTO[2] and Nobuo TORIDE[3]

1. はじめに

近年，電磁波を用いたセンサーの開発が進み，土壌試料中の体積含水率 θ と電気伝導率 EC が同時に測れるようになった．その代表的なものは Time Domain Reflectometry（TDR）である．TDR では電磁波の伝播時間と減衰割合を利用して比誘電率に基づく θ と電気抵抗に基づく EC を測定している．また，TDR とは異なる測定原理で θ と EC を同時に測定する様々なセンサーも急速に普及している．Decagon 社の 5TE や Delta-T 社の WET センサーがその代表的な計器類である．これらのセンサーや TDR で測定される EC は土壌の EC（以下 EC_a）であり，水溶性塩類の濃度だけでなく、土壌水分量にも依存する．そのため，同じ土壌試料中の θ と EC_a が同時に測れることは，土壌溶液の EC（以下 EC_w）を推定し，それをもとに水溶性塩類の濃度を推定する際に大きな利点となる．これら計器類の取扱説明書の一部には，EC の測定原理とともに，測定された土壌の θ と EC_a から EC_w を推定する方法として Rhoades モデルが記されている．土壌の θ と EC_a を同時に測定する様々なセンサーを活用するためには，この Rhoades モデルの理解が必要である．Rhoades モデルは，任意の水分量 θ における 4 極法による塩類土壌の EC_a 測定から，EC_w を推定するモデルであるが，TDR などにより θ と EC_a を同時に精度よく測定できる現在，Rhoades モデルの重要性はより高まっている．

Rhoades モデルを提案した Jim Rhoades 博士は，アメリカ合衆国農務省塩類研究所（U.S. Salinity laboratory）の土壌化学のグループにおいて，土壌の塩類濃度（soil salinity）測定一筋で研究をおこなった人物である．彼は，4 極法を塩類土壌の EC 測定に本格的に導入した．例えば，実験室内で使う小さな容器に電極を挿入する規模からトラクターの後部に大きな電極を配置した野外計測規模の異なる大きさのセンサーを作製し，塩類土壌の EC_a 測定を精力的に行った．当時，圃場で用いられていたセンサーは 1 cm 四方のセラミック板を通過した土壌溶液に対して EC を測定するもので，測定範囲が局所的であった（Richards, 1966）．そのため，根群域の塩類濃度を推定するには，多数のセンサーを設置する必要があった．そこで，電極の配置間隔を適切に設定することにより根群域全体の平均的な EC_a の測定が行える 4 極法を適用した．そして，1971 年には電気抵抗測定による圃場での塩類調査法の論文を発表した（Rhoades and Ingvalson, 1971）.

同じ頃，Gupta and Hanks（1972）は，4 極法による EC_a の水分量依存性に注目して，土壌の塩類濃度の指標として用いられていた飽和抽出（saturation extract）による EC（以下 EC_e）と 1 : 5 水浸出法による EC（以下 $EC_{1:5}$）に対して，次の経験式を得た．

$$\frac{EC_a}{EC_e} \quad \text{または} \quad \frac{EC_a}{EC_{1:5}} = a\theta + b \tag{1}$$

ここで，a と b は実験により決定される土壌固有の定数

[1]NARO Institute of Vegetable and Tea Science, 3-1-1 Kan-nondai, Tsukuba, 305-8666, Japan. Corresponding author: 柳井洋介, 農研機構野菜茶業研究所.
[2]NARO Institute for Rural Engineering, 2-1-6 Kan-nondai, Tsukuba, 305-8609, Japan.
[3]Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-Machiya, Tsu, 514-8507, Japan.
2013 年 10 月 22 日受稿　2013 年 11 月 25 日受理
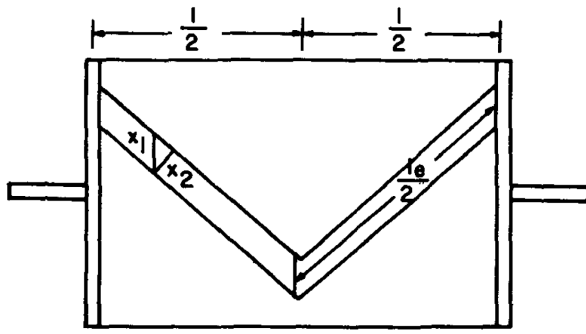
Fig. 1 伝導率セル中の土壌 – 間隙組織の模式図.
Schematic of soil-pore system in conductivity cell.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 1)

である．この関係式により，EC_a と同時に θ の測定が可能であれば，瞬時に EC_a から EC_e や $EC_{1:5}$ を推定することが可能となった．しかし，Rhoades らは Gupta and Hanks（1972）の経験式に対して，(1) 攪乱試料で得られた校正式であり，現場圃場への適用が難しいこと，(2) EC_a を測定した θ とは異なる水分量で決定する土壌の塩類濃度（EC_e や $EC_{1:5}$）に対する関係式であること，(3) 固相表面の EC や土壌溶液が満たされている間隙の屈曲の影響を考慮していないことを問題点として指摘した．この Gupta and Hanks（1972）の経験式をもとに，より厳密なモデルを構築し，精密な実験により検証したのが，今回紹介する Rhoades et al.（1976）の論文である．そこで本稿では，EC_a–θ–EC_w 関係を築いた Rhoades et al.（1976）を取り上げ，モデルが導出された経過を再確認するとともに現在までの関連する議論を概観したい．

2. モデルの導出

不飽和土壌は三相（気相，液相，固相）から成る．このうち気相と，固相を形成する多くの鉱質物質は絶縁体である．これに対して，固相の一部（主に粘土）と液相は導体である．Rhoades et al.（1976）では，土壌の液相と固相の電気抵抗が並列関係にあって土壌の電気抵抗を形成しているとみなした．すなわち，土壌の電気抵抗の逆数から求められる土壌の電気伝導率 EC_a は，液相の寄与分である EC_b と交換性陽イオンによる固相表面の寄与分である EC_s の和で表現できるとした．

$$EC_a = EC_b + EC_s \tag{2}$$

そして，EC_b は土壌溶液の電気伝導率 EC_w と土壌間隙構造に関係する．EC_b は EC_w に比例し，全横断面中の液相部分の伝導であると仮定し，EC_w，断面割合を与える θ，透過係数 T の積で表現し，(2) 式を次式に書き換えた．

$$EC_a = EC_w \theta T + EC_s \tag{3}$$

ここで，透過係数 T は，屈曲度の効果と固液・気液界面近傍でのイオンの移動度を表現し，(1) 式と同様に θ に比例すると仮定した．

$$T = a\theta + b \tag{4}$$

ここで，a と b は定数であり，(1) 式と同じ記号が用いられている．(3) 式において，EC_a の水分量依存性を断面割合と透過性の効果に二分し，透過性の効果に対して Gupta and Hanks（1972）の経験式を適用した点が Rhoades らのオリジナリティである．そのため，(3) 式における EC_a は，θ の 2 次式となる点が特徴である．また，ソーダ質土壌以外では，EC_s は土壌溶液の塩類濃度や水分量に依存せずに一定と見なせることから，(3) 式は，EC_w あるいは θ がゼロに近づくと EC_b はゼロに近づき，その結果として，EC_a は EC_s に近づくことを述べている．このように，EC_a が測定されるときの土壌溶液の EC_w に対して，θ の効果をより精密に考慮し，さらに EC_a に対して EC_s を考慮した点が Gupta and Hanks（1972）のモデルからの進展である．

さらに Rhoades et al.（1976）は，毛管モデル（Porter et al., 1960）から (3) 式の水分量依存性を，Fig. 1 に示す概念図を用いて視覚化した．断面積が A，高さ l の土壌円筒があるとし，液相で占められる部分の断面積 x_2，間隙の長さを l_e とするとき，θ は次式で表せる．

$$\theta = \frac{x_2 l_e}{Al} \tag{5}$$

このとき，土壌円筒中の液相のバルクの電気抵抗 R_b は次のように表せるだろう．

$$R_b = \rho_w \frac{l_e}{x_2} = \frac{1}{EC_w}\frac{l_e}{x_2} \tag{6}$$

ここで ρ_w（$=1/EC_w$）は間隙中の液相の比抵抗である．(6) 式に (5) 式を代入し，水の粘性 γ の影響を導入して EC_w について整理する．

$$EC_w = \left(\frac{1}{\gamma}\right)\left(\frac{l_e}{x_2}\right)\frac{1}{R_b} = \left(\frac{1}{\gamma}\right)\frac{(l_e)^2}{l\theta A}\frac{1}{R_b} \tag{7}$$

更に次のように書き直す．

$$EC_w = \frac{1}{\theta}\left[\frac{1}{\gamma}\left(\frac{l_e}{l}\right)^2\right]\left(\frac{l}{A}\right)\frac{1}{R_b} \tag{8}$$

(8) 式中の $\left[1/\gamma(l_e/l)^2\right]$ は透過係数 T の逆数であり，(l_e/l) は屈曲度，(l/A) は伝導率測定用電極の形状や配置を反映したセル定数と解釈できる．ここでセル定数を G とすると，(8) 式は次式で表現できる．

$$EC_w = \frac{G}{\theta T R_b} \tag{9}$$

交換性陽イオンによる固相表面の伝導性を考慮し，液相と固相のそれぞれの伝導経路が並列に接続していると仮定し，次式を得る．
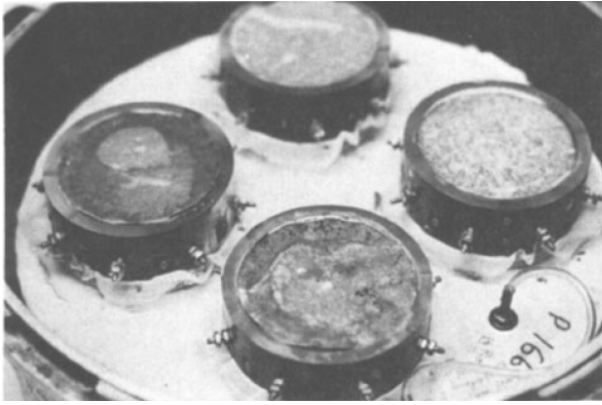
Fig. 2　土壌を詰めた 4 極子セルを加圧板装置内に置き，脱水させながら水分調整を行う様子.
Soil-filled four-electrode cells, positioned in pressure plate apparatus for adjustment of water content.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 2)
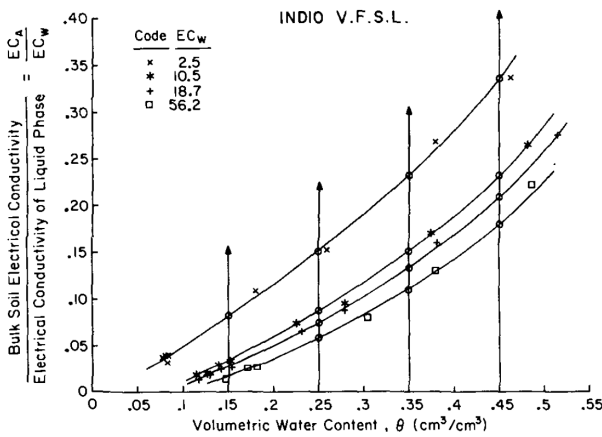
Fig. 3　Indio vfsl の体積含水率 θ と $\mathrm{EC_a/EC_w}$ の関係.
Plot of bulk soil electrical conductivity/liquid phase electrical conductivity, $\mathrm{EC_a/EC_w}$, vs. volumetric water content, θ, for Indio vfsl. (Rhoades et al., 1976, Fig. 3)

$$\frac{1}{R_\mathrm{a}} = \frac{1}{R_\mathrm{b}} + \frac{1}{R_\mathrm{s}} \tag{10}$$

ここで，R_a と R_s はそれぞれ土壌の電気抵抗と固相に起因する電気抵抗である．加えて，(10) 式の各項ともセル定数は一様であると仮定する．

$$\mathrm{EC_a}R_\mathrm{a} = \mathrm{EC_b}R_\mathrm{b} = G \tag{11}$$

(9) ～ (11) 式を併せると (2) 式と同じ式が導かれる．

$$\mathrm{EC_a} = \mathrm{EC_w}\theta T + \mathrm{EC_s} \tag{12}$$

Rhoades 博士らはどうして同じ式を 2 通りの方法で導出してみせたのだろうか．おそらく最初の導出過程が感覚的なところがあり，精確さに欠ける印象があったためと推察される．ところで，第二著者の Peter Raats 博士は，この論文が書かれた 1970 年代に塩類研究所に研究員として所属し，その後，ワーゲニンゲン農科大学に移ったオランダ人研究者であり，数学と物理学に秀でた理論家である．Rhoades 博士と Raats 博士の接点はこの論文のみであることから，当時，新進気鋭の研究者であった Raats 博士の貢献がここに表れているように感じられる．このようにして (3) 式の Rhoades モデルは，「伝導経路が並列に接続していること」と「セル定数が一様」と仮定することにより理論的に裏付けられたことが (12) 式からわかる．

3. モデル係数の決定のための実験

(3)，(4) 式を用いて $\mathrm{EC_a}$ を $\mathrm{EC_w}$ と $\mathrm{EC_s}$ の関数として表記するため，Rhoades 博士らは不撹乱試料を用いて，$\mathrm{EC_w}$ と体積含水率 θ が既知の条件で $\mathrm{EC_a}$ を測定した．

内径 7.5 cm，高さ 3.9 cm の円筒容器に採取された 4 種類の不撹乱土壌試料を試験に供した．この円筒容器の側面に 45° 間隔で 8 本の電極を挿入し，隣どうしの電極 4 本を用いた測定を行い，1 本ずつずらして 8 回の $\mathrm{EC_a}$ を測定し，その平均値を測定値とした．測定機器類の詳細および電極のセル定数の決定方法は，Rhoades et al. (1977) に示されている．また，用いた 4 種類の $\mathrm{EC_w}$ の溶液の濃度は，SAR = 4 (sodium adsorption ratio；Na 吸着比) として調整した．SAR は溶液中の 2 価の陽イオンとナトリウム (Na^+) の補正濃度比であり，SAR が一定であれば，濃度が異なっても交換性陽イオン組成が等しいと見なせる．SAR < 7 の潅漑水であれば土壌をソーダ質化させる危険性が低いとされており (Bolt and Bruggenwert, 1989)，SAR = 4 は，交換性 Na^+ が小さい条件である．そして，土壌試料を加圧板装置により脱水させながら水分調整を行った (Fig. 2)．

こうして間隙構造を乱していない不撹乱土壌試料の $\mathrm{EC_a}$，θ，$\mathrm{EC_w}$ の関係を求めた．測定した 4 種類の土壌の θ，マトリックポテンシャル，$\mathrm{EC_w}$ 値の範囲は，原著の Table 2 に示されている．

4. モデル係数の決定

Rhoades モデルの係数を決定するために，(3) 式の各項を $\mathrm{EC_w}$ で除して変換する．

$$\frac{\mathrm{EC_a}}{\mathrm{EC_w}} = T\theta + \frac{\mathrm{EC_s}}{\mathrm{EC_w}} \tag{13}$$

そして，θ に対する $\mathrm{EC_a/EC_w}$ の測定値のプロットが Fig. 3 である．(13) 式は (1) 式と同様の形式であるが，Gupta and Hanks (1972) の直線関係ではなく，曲線の関係である．そのため，θ が 0 のときの $\mathrm{EC_a/EC_w}$ の値が判然としない．そこで，Fig. 3 において 4 段階の θ に対して $\mathrm{EC_w}$ と $\mathrm{EC_a}$ を近似曲線から読み取った値の関係が Fig. 4 である．この関係に対して $\mathrm{EC_w}$ を 0 まで外挿すると，(3) 式より $\mathrm{EC_s}$ が得られる．このようにして求めた Rhoades モデルの $\mathrm{EC_s}$ は，原著の Table 3 に示されている．
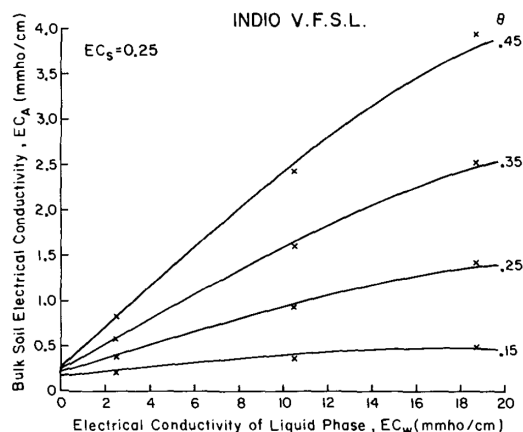
Fig. 4 異なる体積含水率 θ のときの土壌溶液の電気伝導率 EC_w と土壌の電気伝導率 EC_a の関係．Fig. 3 より体積含水率を固定して求めた．また，y 軸との切片は土粒子表面の電気伝導率 EC_s を表す．
Plot of bulk soil electrical conductivity, EC_a, vs. liquid-phase electrical conductivity, EC_w, for various fixed volumetric water contents as interpolated from Fig. 3 Indio vfsl showing the extrapolated value of surface conductivity, EC_s.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 4))
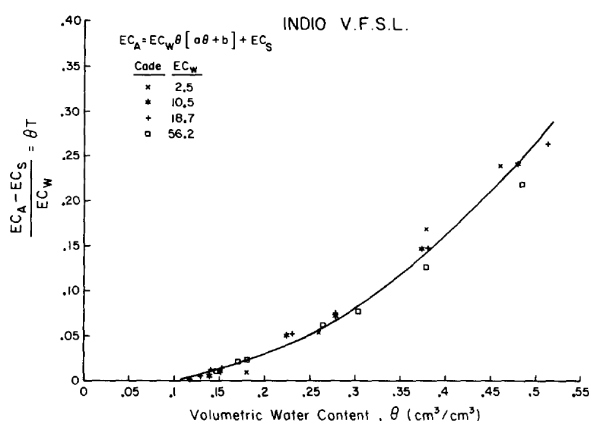
Fig. 5 Indio vfsl の体積含水率 θ と $(EC_a - EC_s)/EC_w$ の関係．曲線は Fig. 6 で求めた a と b の値を用いて（2），(3) 式（原著（5），(6）式）により求めた．
Plot of bulk soil electrical conductivity-surface conductivity/ liquid-phase electrical conductivity, $(EC_a - EC_s)/EC_w$, versus volumetric water content, θ, for data of Fig. 3 and 4 compared to the curve calculated from Eq. (5) and (6) with the values of a and b determined from Fig. 6.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 6)

EC_s が決定したので，その値を用いて今度は θ に対する $(EC_a - EC_s)/EC_w$ をプロットする（Fig. 5）．Fig. 3 では EC_w 毎の近似曲線が必要であったが，Fig. 5 では，一つの曲線に収束した．これは，EC_s が土壌溶液の塩濃度と水分量に依存しないとした仮定の妥当性を示す．

さらに，透過係数 T を与える $(EC_a - EC_s)/(EC_w\theta)$ と θ の関係をプロットしたのが Fig. 6 である．この結果は，T を θ の 1 次式と仮定した（4）式の妥当性を検証している．傾きと切片から（4）式の a と b が求められる．このように，非常に高い相関係数の直線が得られたことは，モデルの妥当性のみならず，細心の注意を払った丹念な実験の繰り返しにより生まれたことは間違いない．まさに Rhoades 博士の研究に対する姿勢が伺える結果である．

Rhoades 博士らの実験で用いた土壌試料について得られたモデルの係数を Table 1 に示す．（4）式より，$\theta = -b/a$ のとき $T = 0$ となる．Rhoades らは $\theta_t = -b/a$ を限界体積含水率（threshold water content）と定義し，この体積含水率より高い土壌水分のときのみモデルが適用可能であるとした．推定された θ_t は 0.1 程度であり，適用範囲を圃場容水量程度の高水分領域とした Rhoades and Ingvalson（1971）の報告に比べて，低水分領域での妥当性を確認した．

5. Rhoades et al. (1976) 発表後

（4）式の a，b が一定であれば，θ 一定の場合，EC_a–EC_w は線形関係となる．そのため，ここまで示したモデルは，以下に示す改良モデルに対して線形モデルと呼ばれる．a，b が一定であることを検証した Fig. 6 は，比較的溶液濃度が高い領域での実験で得られた関係である．一方，土壌溶液濃度が低下すると，拡散二重層を含む固相表面の影響が相対的に大きくなり，イオン濃度や組成の変化は（4）式の a，b を変化させる．そのため，イオン濃度が低い領域において，EC_w のどの範囲まで EC_a–EC_w 関係が線形性を有するかが議論されてきた．Rhoades et al.（1976）では，2.5 ~ 56 dS m^{-1} の EC_w 範囲で EC_a–EC_w 関係の線形性の成立を実験的に示したが，その後の研究では，おおよそ 4 dS m^{-1} 以下の EC_w の範囲では EC_a–EC_w 関係が非線形となることが報告された（Shainberg et al., 1980; Nadler and Frenkel, 1980）．EC_w の低い範囲では固相と液相が直列に接続された伝導経路を並列モデルに組み込むことにより表現できると考えられた（Shainberg et al., 1980）．しかし，導入された幾何パラメータには，物理化学的または鉱物学的な意味付けはなかった．

Rhoades et al.（1989）は，動水（連続的な液相部分）と不動水（間隙中に保持され不連続な液相部分）の概念を導入した改良モデルを提案した．このモデルでは，次の 3 つの伝導経路を仮定している．すなわち，(1) 固相と液相が直列に接続された伝導経路（微細間隙中の液相を想定），(2) 固相のみの伝導経路（土粒子表面の伝導を想定），(3) 連続的な液相部分の伝導経路（粗間隙中の液相を想定）である．

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_s}{\theta_{ss} EC_{ws} + \theta_{ws} EC_s}\right] + \theta_{sc} EC_s + \theta_{wc} EC_{wc} \tag{14}$$

ここで，θ_{ws} は固相と液相が直列に接続された伝導経路の体積含水率，θ_{wc} は連続的な液相部分の体積含水率，θ_{ss} は固相と液相が直列に接続された伝導経路の固相の体積割合，θ_{sc} は固相のみの伝導経路の固相の体積割合，

Table 1　供試土壌について得られたモデル係数.
Determined surface conductivities, transmission coefficient parameters, and threshold water contents of soils studied. (Rhoades et al., 1976, Table 3)

Soil type	EC_s	A	b	θ_t	R
	$dS\ m^{-1}$				
Pachappa fsl	0.18	1.382	−0.093	0.07	0.96
Indio vfsl	0.25	1.287	−0.116	0.09	0.98
Waukena l	0.4	1.403	−0.064	0.05	0.97
Domino cl	0.45	2.134	−0.245	0.12	0.92
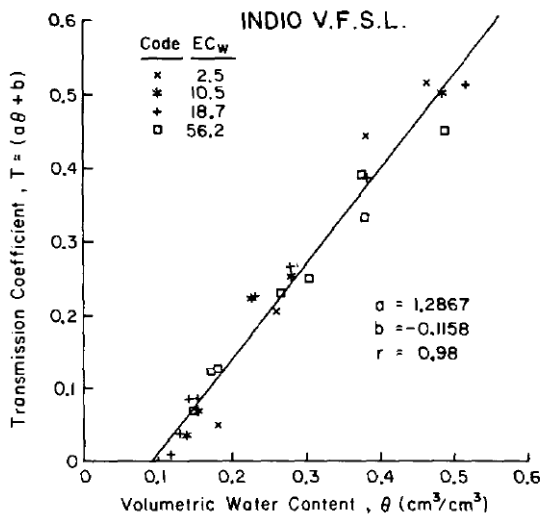
Fig. 6　Indio vfsl の体積含水率 θ と透過係数 T の関係. Fig. 3，4 と（12）式（原著（15）式）から求めた.
Relation of the transmission coefficient, T, and volumetric water content, θ, determined for Indio vfsl from the data of Fig. 3 and 4 and Eq. (15). (Rhoades et al., 1976, Fig. 6)

EC_{ws} と EC_{wc} は固相と液相がそれぞれ直列，並列に接続された伝導経路の液相の電気伝導率である.

しかし，固相のみの伝導経路の EC_a に対する寄与は小さいため，土粒子間の接続部のみを通じた導電を無視することにより，簡略化したモデルも提案した.

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_s + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_s}{\theta_s EC_{ws} + \theta_{ws} EC_s}\right] + (\theta_w - \theta_{ws}) EC_{wc} \quad (15)$$

ここで，θ_s は固相の体積割合，$(\theta_w - \theta_{ws})$ は連続的な液相部分の体積割合である．このモデルは土壌の各電気抵抗の並列接続を仮定したモデル（(3) 式）に比べて適用性が高く，特に EC_w の低い範囲（おおよそ 4 $dS\ m^{-1}$ 以下の EC_a–EC_w 関係が非線形となる範囲）で EC_a–EC_w 関係をよく表現できる．しかし，取得が難しい経験的パラメータが増えてしまったため，その利用が制限される.

Rhoades 博士は長年行ってきた研究をもとに 1999 年に塩類土壌の評価方法を FAO Manual にまとめている（Rhoades et al., 1999）．その中では，EC_a から EC_w を推定するモデルとして非線形モデルである（14）式を紹介している．また，EC_a の測定方法として 4 極法の他，Rhoades も長年開発にかかわってきた電磁誘導法（Rhoades, 1992）についても紹介されている.

他方，Dalton et al.（1984）によって TDR で土壌水分量と EC_a の同時計測の可能性が示されると，溶質移動研究への TDR の応用が始まった．そして，TDR で計測される EC_a を用いて溶質濃度を推定する試みも行われた．特に野外計測では，土壌水分量も経時的に変化するため，TDR で計測される θ と EC_a から EC_w を推定することができれば，EC_w と溶質濃度の時間変化を明らかにすることができる．このような理由から，TDR を用いて非定常過程での溶質移動研究を行っている研究者から EC_a–θ–EC_w 関係に再び大きな関心が注がれ（Ward et al., 1994; Heimovaara et al., 1995; Mallants et al., 1996; Risler et al., 1996），最も単純な Rhoades モデルがよく利用されるようになった（Bhabani et al., 1999; De Neve et al., 2000; Muñoz-Carpena et al., 2005）．現在では，Rhoades et al.（1976）の線形モデルは，いくつかの商品化された水分センサーのプログラムにも組み込まれている.

6. おわりに

「土壌の物理性」でもたびたび解説されるように，土壌中の水分・電気伝導率の原位置同時測定は長年切望されてきた課題である（堀野・丸山, 1992; 登尾, 2003）．Rhoades モデルが考案された当時は，4 極法による EC_a 測定値から任意の水分条件に対し EC_w を推定する実用のための理論の確立が主たる目的であった．そのため，丹念な実験が繰り返し行われ，理論的な裏付けも得ながら Rhoades モデルが提案された．その後，TDR をはじめ各種センサーで土壌試料の θ と EC_a を同時に測定できるようになり，再び Rhoades モデルが脚光を浴びることになる．「古典」とは書かれた時代の要請に応えるのみならず，その後の新しい展開の中でも回顧されうる何かを持っているものである．そのような意味で，Rhoades et al.（1976）は古典と呼ぶに相応しい論文の一つであると考える.

近年，EC_a の計測に基づいた EC_w の推定は，土壌物理学の専門家でなくても可能となる基盤が整いつつある．しかし，このような事態は「土壌固相の電気伝導率（EC_s）は 0.25 $dS\ m^{-1}$ が提案されている」といった数値の一人歩きを誘発しうる．本稿で読み起こした通り，Rhoades 博士らが示した EC_s は，現場で採取した試料そのものの値ではなく，不攪乱試料に電解質溶液で調整操作を施した試料の値である．EC_s は水分量や土壌溶液中の塩類濃度に依存しないことは実験的に示されているが，Rhoades et al.（1976）の Table 2 中の CEC と Table 3 中の EC_s が有意な正の相関を示すことから，ソーダ質化していない土壌については，交換性陽イオン量に依存して高くなることが予想される．また，ソーダ質化した土壌ではさらに高い値を示すこともあると考えられ，「EC_s

は 0.25 dS m^{-1}」のみに注目することのないように留意されたい．

最後に，わが国の土壌で EC_a–θ–EC_w 関係を実験的に取得した例が少なく，砂丘砂（井上・塩沢, 1994; Deghghanisanij et al., 2004）と火山灰土壌（Miyamoto et al., 2010; 植松ら, 2012）などに限られている．今後，土壌物理学会員によって，わが国の土壌についても EC_a–θ–EC_w 関係の特徴が解明され，Rhoades モデルの適用性の検討や改良，汎用計算プログラムの提案等に発展していくことが期待される．

謝辞

本稿の執筆にあたり，原口暢朗博士より粘土の化学性についての貴重なご助言を賜った．岩田幸良博士には初期の原稿に対して一緒に議論していただいた．記して深く謝意を表す．

引用文献

Bhabani, S.D., Wraith, J.M. and Inskeep, W.P. (1999): Nitrate concentrations in the root zone estimated using time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 63: 1561–1570.

Bolt. G.H. and Bruggenwert, M.G.M (1989): 土壌の化学（岩田進午, 三輪睿太郎, 井上隆弘, 陽　捷行 訳）, pp. 191–212, 学会出版センター, 東京.

Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. and Rhoades, J.D. (1984): Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of water content and electrical conductivity with a single probe. Science, 224: 989–990.

Dehghanisanij, H., Yamamoto, T. and Inoue, M. (2004): Practical aspects of TDR for simultaneous measurements of water and solute in a dune sand field. 土壌の物理性, 98: 21–30.

De Neve, S., Van De Steene, J., Hartmann, R. and Hofman, G. (2000): Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. Eur. J. Soil Sci., 51: 295–304.

Gupta, S.C. and Hanks, R.J. (1972): Influence of Water Content on Electrical Conductivity of the Soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36: 855–857.

Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1995): Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 59: 689–698.

堀野治彦, 丸山利輔 (1992): TDR による土壌の体積含水率および電気伝導度の測定について. 土壌の物理性, 65: 55–61.

井上光弘, 塩沢　昌 (1994): 4 極法による土壌カラム内の電気伝導度測定とその応用. 土壌の物理性, 70: 23–28.

Mallants, D., Vanclooster, M., Toride, N., Vanderborght, J., van Genuchten, M.Th. and Feyen, J. (1996): Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in unsaturated soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 747–754.

Miyamoto, T., Kameyama, K. and Shinogi, Y. (2010): Electrical conductivity and nitrate concentrations in an Andisol field using time domain reflectometry. Proceedings of 19th World Congress of Soil Science, 54–57.

Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Ritter, A., Alvarez-Benedi, J. and Socorro, A.R. (2005): TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. Geoderma, 124: 399–413.

Nadler, A. and Frenkel, H. (1980): Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by four-electrode method. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 1216–1221.

登尾浩助 (2003): 実践 TDR 法活用—土壌中の水分・塩分量の同時測定—. 土壌の物理性, 93: 57–65.

Porter, L.K., Kemper, W.D., Jackson, R.D. and Stewart, B.A. (1960): Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 24: 460–463.

Richards, L.A. (1966): A soil salinity sensor of improved design. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30: 333–337.

Rhoades, J.D. (1992): Instrumental field methods of salinity appraisal. In Topp, G.C., Reynolds W.D. and Green, R.E. (ed.) Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. pp. 231–248, SSSA Special Publication No. 30, Madison.

Rhoades, J.D. (1999): Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. p.150, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Rhoades, J.D. and Ingvalson, R.D. (1971): Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35: 54–60.

Rhoades, J.D., Raats, P.A. and Prather, R.J. (1976): Effects of liquid–phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 651–655.

Rhoades, J.D., Kaddah, M.T., Halvorson, A.D. and Prather, R.J. (1977): Establishing soil electrical conductivity–salinity calibrations using four–electrode cells containing undisturbed soil cores. Soil Sci. 123: 137–141.

Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J. and Alves, W.J. (1989): Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J., 53: 433–439.

Risler, P.D., Wraith, J.M. and Gaber, H.M. (1996): Solute transport under transient flow conditions estimated using time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 1297–1305.

Shinberg, I., Rhoades, J.D. and Prather, R.J. (1980): Effect of exchangeable sodium percentage, cation exchange capacity, and soil solution concentration on soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 469–473.

植松慎一郎, 長谷川周一, 宮﨑　毅, 西村　拓 (2012): 黒ボク土畑表層のバイパス流の定量化. 2011 土壌水分ワークショップ論文集, 64–71.

Ward, A.L., Kachanoski, R.G. and Elrick, D.E. (1994): Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 58: 1031–1039.

要　旨

近年，TDR などにより，土壌試料中の体積含水率 θ と電気伝導率 EC を同時に測れるようになった．ここで測定される土壌の EC_a は，土壌溶液の EC_w と θ に大きく依存する．本稿では，4 極法による土壌の EC_a 測定に対して，EC_a–θ–EC_w 関係を築いた Rhoades et al.（1976）を取り上げ，モデルが導出された経過を再確認し，現在までの関連する議論を概観した．Rhoades モデルは，土壌の液相と固相が並列の電気抵抗を形成していると仮定し，土壌溶液の塩濃度と水分量に依存しない固相の電気伝導率 EC_s と θ に比例する透過係数 T を導入して導出された．さらに，Rhoades らは，4 種類の不攪乱土壌試料を用いた細心の注意を払った丹念な実験によりモデルの検証も行った．4 極法による当時の EC 測定では θ の同時測定は困難であったが，TDR など普及した今日において，更にその重要性が増した論文である．

キーワード：Rhoades モデル，塩類土壌，4 極法，Time Domain Reflectometry，溶質移動